

УДК 66.074.2

А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева,  
А. А. Галиев

## ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНОГО ОФОРМЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕПАРАТОРА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ ГАЗА ОТ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

*Ключевые слова: сепаратор, мелкодисперсные частицы, улавливание твердых частиц, очистка газового потока, тканевый фильтр.*

*Проблемы экологии чрезвычайно актуальны для предприятий химической и нефтехимической отрасли промышленности. Причем одной из важнейших задач является проблема очистки газов от мелкодисперсной пыли. В большинстве случаев данная проблема решается использованием циклонов, улавливающих до 90% твердых частиц размером до 10 мкм. Однако устанавливаемые циклоны внутри помещений имеют достаточно низкую эффективность, вследствие элементарной конструкции. Как правило, основную часть пыли в данных аппаратах улавливает тканевый фильтр, который устанавливается после циклонов. В связи с тем, что ткань фильтра достаточно быстро забивается, эффективность установки существенно падает, и установка не производит отсос пыли из запыленной зоны. Для решения указанной проблемы авторами данной статьи предлагается заменить тканевый фильтр после циклона на разработанный прямоугольный сепаратор. Разработанное устройство имеет простую конструкцию и высокую эффективность до 99,9% улавливания мелкодисперсных частиц размером в диапазоне 1–10 мкм. Разработанный аппарат конструктивно представляет собой прямоугольный корпус, внутри которого находится несколько рядов элементов. Особый интерес в прямоугольном сепараторе представляет различное оформление элементов внутри устройства, которое может существенно влиять на эффективность улавливания мелкодисперсных частиц и на гидравлическое сопротивление устройства. Для расчетов процессов улавливания мелкодисперсных частиц пыли в сепараторах с внутренними элементами разной конфигурации использовался метод конечных элементов в программном комплексе. В работе проведено исследование эффективности очистки многофазного газового потока от мелкодисперсных твердых частиц прямоугольным сепаратором с различным конструктивным оформлением элементов внутри аппарата. Сравнительный анализ конструкции по эффективности сепарации при использовании различных элементов внутри аппарата показал преимущество использования двутавровых элементов. Эффективность улавливания мелкодисперсной пыли в среднем на 17% выше, чем дугообразных элементов. Однако требуются большие затраты на работу компрессора в связи с более высокими потерями давления.*

A. V. Dmitriev, V. E. Zinurov, O. S. Dmitrieva,  
A. A. Galiev

## INFLUENCE OF STRUCTURALLY DESIGNING THE ELEMENTS OF A RECTANGULAR SEPARATOR UPON THE EFFICIENCY OF GAS CLEANING FROM SOLID PARTICLES

*Keywords: separator, finely divided particles, catching of solids, cleaning of a gas stream, cloth filter.*

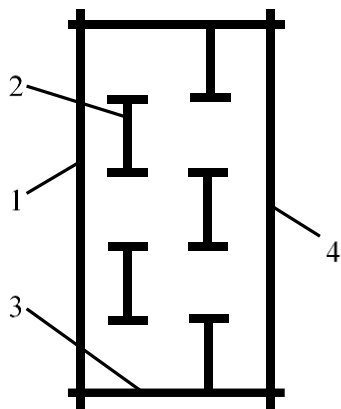
*Environmental issues are extremely urgent for the companies acting in chemical and petrochemical industries. At the same time, one of the most important tasks is removing fine dust from gases. In most cases, this problem is solved using cyclones filtering up to 90 % of solid particles sized up to 10  $\mu\text{m}$ . However, cyclone filters installed inside rooms are not very efficient due to their elementary design. As a rule, the basic part of the dust in such apparatuses are intercepted by a cloth filter that is installed downstream of the cyclones. Since the filter cloth becomes blind rather quickly, the efficiency of the facility falls significantly, so the facility does not dedust the dusty area any further. To solve the above problem, the authors of this paper propose to replace the cloth filter downstream of the cyclone with the rectangle separator developed. The facility developed has a simple design and the high efficiency of up to 99.9 % of filtering fine particles sized within the range of 1-10  $\mu\text{m}$ . By its design, the device developed represents a rectangle case, inside which there are several rows of elements. In the rectangle separator, of special interest are the differently configured elements inside the device, which may affect the efficiency of intercepting fine particles and the hydraulic resistance of the device. To calculate the processes of intercepting fine dust particles in separators with differently configured internal elements, we used the finite-element method in a software suite. The paper presents the study of the efficiency of removing fine solid particles from multi-mode gas flow, using a rectangle separator with differently configured elements inside it. Comparative analysis of the design regarding the separation efficiency when using different elements inside the apparatus has shown the advantage of using H-shaped elements. The efficiency of intercepting fine dust is averagely about 17 % higher than that of bow-shaped elements. However, considerable compressor operation costs are required, due to higher pressure losses.*

В настоящее время остро стоит проблема очистки газов от мелкодисперсной пыли для предприятий химической и нефтехимической отрасли промышленности. Аппараты для очистки газов от твердых и жидких механических включений являются важной составляющей частью при комплектовании технологической аппаратуры на производстве. Так, напри-

мер, благодаря высокой эффективности работы циклонов, отсутствию движущихся частей в аппарате и надежной работе при высоких температурах до 500°C и при высоких давлениях данные устройства стали неотъемлемой частью процессов газоочистки на предприятиях химической и нефтехимической отраслях промышленности. Однако устанавливаемые

циклоны внутри помещений имеют достаточно низкую эффективность, вследствие элементарной конструкции. Как правило, основную часть пыли в данных аппаратах улавливает тканевый фильтр, который устанавливается после циклонов, но в связи с тем, что ткань фильтра достаточно быстро забивается, эффективность установки существенно падает, и она не производит отсос пыли из запыленной зоны [1–6].

Для устранения описанной проблемы авторами настоящей статьи предлагается заменить тканевый фильтр после циклона на разработанный прямоугольный сепаратор (рис. 1, 2). Данное устройство имеет простую конструкцию и высокую эффективность до 99,9% улавливания мелкодисперсных частиц размером в диапазоне 1–10 мкм [7]. Разработанный аппарат визуально представляет собой прямоугольный корпус, внутри которого находится несколько рядов элементов. Для обеспечения надежности и прочности конструкции элементы крепятся своими концами к верхней и нижней стенкам корпуса сепаратора. Для использования прямоугольного сепаратора в процессах газоочистки предлагается его разместить после циклона. Тогда очищенный газовый поток от твердых частиц размером до 10 мкм после циклона будет проходить через прямоугольный сепаратор. Процесс обеспыливания газа в сепараторе можно описать следующим образом: многофазный газовый поток, попадая в устройство, проходит через несколько рядов элементов, в ходе своего движения загрязненный газ огибает элементы и имеет с ними непосредственный контакт. При движении

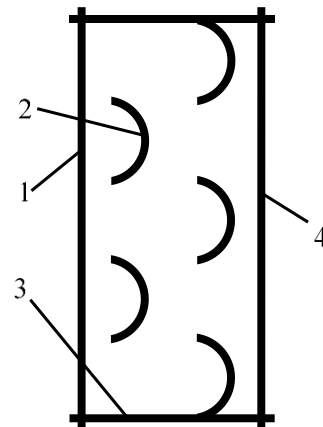


**Рис. 1 – Двухмерная модель прямоугольного сепаратора с двутавровыми элементами внутри (вид сверху): 1 – входной патрубок, соединяющий циклон с прямоугольным сепаратором; 2 – двутавровые элементы внутри сепаратора; 3 – корпус устройства; 4 – выходной патрубок сепаратора**

между элементами устройства возникают микровихри, в которых центробежная сила отталкивает мелкодисперсные частицы к стенкам элементов. За счет того, что их размер менее 10 мкм, они прилипают к стенкам. Также при непосредственном контакте газа с поверхностью стенок элементов часть мелкодисперсных частиц выбивается из потока. Вследствие двух этих процессов происходит очистка многофазного газового потока в сепараторе. Стоит отметить,

что прямоугольный сепаратор является разборным, что дает возможность промывать поверхность стенок элементов после определенного срока эксплуатации, который зависит от производственных факторов, в основном от производительности [8–14]. Особый интерес в прямоугольном сепараторе представляет различное оформление внутренних элементов устройства, которое может существенно влиять на эффективность улавливания мелкодисперсных частиц и на гидравлическое сопротивление устройства.

Целью данной работы является исследование очистки многофазного газового потока от мелкодисперсных частиц прямоугольным сепаратором при различном конструктивном оформлении элементов внутри аппарата. В процессе данной работы производились сравнительные анализы по эффективности и перепаду давления в сепараторах при использовании различных элементов внутри аппарата: двутавровых элементов (рис. 1) и дугообразных элементов (рис. 2).



**Рис. 2 – Двухмерная модель прямоугольного сепаратора с дугообразными элементами внутри (вид сверху): 1 – входной патрубок, соединяющий циклон с прямоугольным сепаратором; 2 – дугообразные элементы внутри сепаратора; 3 – корпус устройства; 4 – выходной патрубок сепаратора**

Для расчетов процессов улавливания мелкодисперсных частиц в прямоугольных сепараторах при различном конструктивном оформлении элементов внутри аппаратов использовался метод конечных элементов в программном комплексе Ansys Fluent. В ходе исследования использовалась модель турбулентности – SST. Геометрические размеры корпусов сепараторов были идентичными: длина – 80 мм, ширина – 95 мм, высота – 80 мм, толщина стенок – 1 мм. В ходе расчетов задавались следующие постоянные параметры: атмосферное давление на выходе из аппарата  $10^5$  Па, начальная скорость частиц в газовом потоке 0 м/с, число частиц, находящихся в газе  $n$  принималось равным 1000, массовый расход продуктов сгорания  $G = 10$  г/с (0,01 кг/с), скорость газового потока  $W = 3$  м/с. Для получения результатов исследований изменялся диаметр частиц в газе  $a$  в диапазоне 1–10 мкм. Максимальное и минимальное число элементов в ряду сепаратора принималось равным 3 и 2 соответственно.

Эффективность улавливания мелкодисперсных частиц прямоугольного сепаратора  $E$  определялась по формуле:

$$E = \frac{n - n_k}{n},$$

где  $n_k$  – число частиц, осевших на всех стенках элементов прямоугольного сепаратора.

Перепад давления в сепараторе определялся по формуле:

$$\Delta p = p_1 - p_4,$$

где  $p_1$  – давление на входном патрубке сепаратора 1;  $p_4$  – атмосферное давление на выходном патрубке 4 (рис. 1, 2).

Результаты исследований были представлены графически на рис. 3–4. Показано, что использование прямоугольного сепаратора с двутавровыми элементами внутри устройства эффективнее, чем с дугообразными элементами. Однако потери давления при использовании двутавровых элементов выше, что повышает нагрузку на компрессор.

Средняя эффективность улавливания мелкодисперсных частиц размером в диапазоне 1–10 мкм при использовании двутавровых и дугообразных элементов равна 44,7% и 61,7% соответственно. Следует отметить, что дугообразные элементы позволяют улавливать мелкодисперсную пыль размером до 3 мкм в среднем с эффективностью 14,5%, что на 6,5% выше, чем при использовании двутавровых элементов. Однако при размере частиц в диапазоне 4–10 мкм эффективность двутавровых элементов в среднем выше на 32,5%, чем у дугообразных элементов. Можно отметить, что при диаметре частиц более 10 мкм эффективность двутавровых и дугообразных элементов близка к 100% (рис. 3).

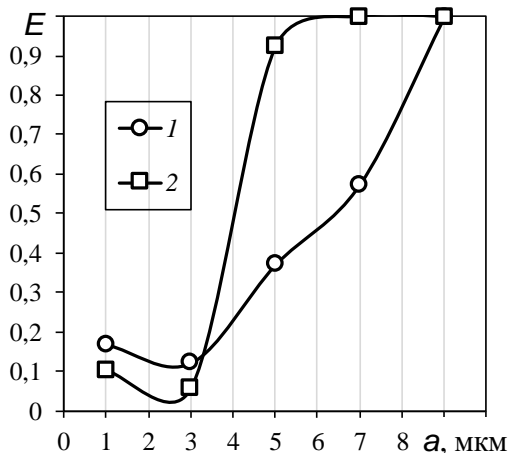


Рис. 3 – Изменение эффективности улавливания мелкодисперсных частиц от их диаметра при различном конструктивном оформлении элементов: 1 – дугообразные элементы; 2 – двутавровые элементы

Более высокая эффективность улавливания мелкодисперсных частиц при использовании двутавровых элементов объясняется наличием выступов у элементов, которые образуют непроходимые перегородки и не позволяют твердым частицам проскальзывать по поверхности и возвращаться в газовый

поток, как в случае с дугообразными элементами. Стоит отметить, что при контакте мелкодисперсных частиц с поверхностями элементов, как указывалось ранее, они прилипают к стенкам, однако по истечению времени, вследствие вибраций элементов, вызванных взаимодействием газового потока с ними, наблюдается проскальзывание частиц по поверхностям элементов.

Исследование показало, что потери давления при использовании дугообразных элементов меньше, чем при двутавровых элементах на 58,29 Па. Более скругленные поверхности элементов позволяют существенно сократить количество местных сопротивлений в сепараторе (рис. 4).

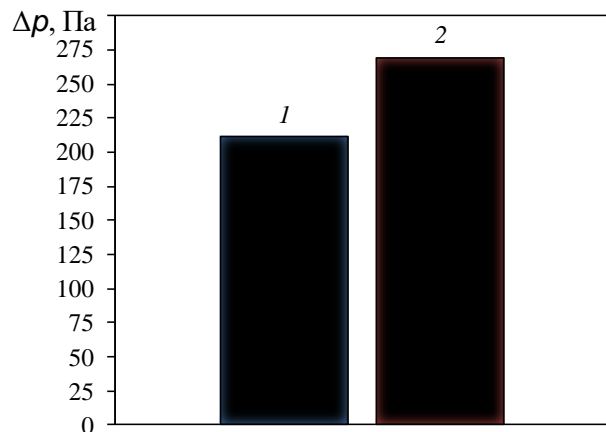


Рис. 4 – Потери давления в прямоугольном сепараторе при различном оформлении элементов внутри устройства: 1 – дугообразные элементы; 2 – двутавровые элементы

Применение прямоугольного сепаратора может стать альтернативой использования тканевого фильтра после циклона в производственных помещениях. Высокая эффективность сепаратора позволяет улавливать мелкодисперсные частицы размером в диапазоне 1 – 10 мкм с эффективностью до 99,9%. Произведенное исследование показало, что при использовании двутавровых элементов эффективность прямоугольного сепаратора на 17 % выше, чем при использовании дугообразных элементов, однако возникает необходимость в более мощном компрессоре в связи с наибольшими потерями давления. Достоинства конструкции прямоугольного сепаратора: малая металлоемкость, высокая степень улавливания мелкодисперсных частиц, возможность регенерации элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-4522.2018.8.

### Литература

1. В.Г. Шарафутдинова, Я.П. Чтаев, *Вестник Казанского технологического университета*, **17**, 4, 238-240 (2014).
2. С.А. Соловьев, А.Н. Гайфутдинов, О.В. Соловьева, *Вестник технол. ун-та*, **20**, 23, 79-82 (2017).
3. Ю.И. Санаев, *Обеспыливание газов электрофильтрами*. Кондор-Эко, Семibrатово, 2009. 156 с.
4. В. Страус, *Промышленная очистка газов*. Химия, Москва, 1981. 616 с.

5. М.Г. Зиганшин, А.А. Колесник, В.Н. Посохин, *Проектирование аппаратов пылегазоочистки*. Экопресс-3М, Москва, 1998. 505 с.
6. В.С. Швыдкий, М.Г. Ладыгичев, *Очистка газов*. Теплоэнергетик, Москва, 2002. 640 с.
7. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, Нгуев Ву Линь, *Вестник Иркутского государственного технического университета*, **22**, 3(134), 138-144 (2018).
8. Г.М.-А. Алиев, *Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов*. Metallurgia, Москва, 1986. 544 с.
9. *Каталог пылегазоочистного оборудования*. Международный фонд конверсии, 1990. 238 с.
10. B. Sagot, A. Forthomme, L. Ait Ali Yahia, *Journal of Aerosol Science*, **110**, 53-69 (2017).
11. В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдбер, *Подготовка промышленных газов к очистке*. Химия, Москва, 1975. 216 с.
12. А.Г. Титов, З.Р. Гильванова, *Инженерный вестник Дона*, **23**, 4-2(23), 55 (2012)
13. А.В. Толстых, Ю.Н. Дорошенко, *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*, **3**, 50, 201-209 (2015)
14. М.Г. Моргулис, М.Г. Мазус, А.С. Мандрико, М.И. Биргег, *Рукавные фильтры*. Машиностроение, Москва, 1977. 256 с.

---

© **А. В. Дмитриев** – д.т.н., доцент, зав. кафедрой ТОТ ФГБОУ ВО «КГЭУ», ieremiada@gmail.com, **В. Э. Зинуров** – магистрант ФГБОУ ВО «КГЭУ», vadd\_93@mail.ru, **О. С. Дмитриева** – к.т.н., доцент кафедры ПАХТ ФГБОУ ВО «КНИТУ», ja\_deva@mail.ru, **А. А. Галиев** – магистрант ФГБОУ ВО «КГЭУ», azat.galiev.1995@mail.ru.

© **A. V. Dmitriev** – doctor of technical sciences, associate professor, the head of «Theoretical Bases of Heat Engineering» chair, KSPEU, ieremiada@gmail.com, **V. E. Zinurov** – graduate student, KSPEU, vadd\_93@mail.ru, **O. S. Dmitrieva** – candidate of technical sciences, associate professor of PACHT chair, Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology, ja\_deva@mail.ru, **A. A. Galiev** – graduate student, KSPEU, azat.galiev.1995@mail.ru.